

PENGUJIAN MEKANIS DAN KOROSI PADA WELD OVERLAY PIPA API 5L X65 PSL HASIL PENGELASAN GTAW

Nugroho Pratomo Ariyanto^{1*}, Ari Wibowo¹, Wowo Rossbandrio², Hanifah Widiastuti³, Domi Kamsyah²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

² Program Studi Teknik Perawatan Pesawat Udara, Politeknik Negeri Batam

³ Program Studi Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi, Politeknik Negeri Batam

*Corresponding author: nugroho@polibatam.ac.id

Article history

Received:

21-12-2022

Accepted:

30-05-2023

Published:

30-06-2023

Copyright © 2023
Jurnal Teknologi dan
Riset Terapan

Open Access

Abstrak

Pelapisan (*cladding*) material *corrosion resistant alloy* (CRA) menggunakan Inconel 625 memadukan properti ketahanan korosi Inconel 625 dan kekuatan (*high strength*) pipa baja API 5L X65. Sampel lapisan CRA difabrikasi dengan pengelasan Pulsed Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Filler metal ERNiCrMo-3 dengan dua merk yang berbeda, yaitu RW625 dan NM625, digunakan sebagai material CRA. Pengujian non-destruktif berupa *visual testing*, *liquid penetrant testing* dan *ultrasonic testing* menunjukkan tidak terdapat cacat pengelasan pada deposisi lapisan CRA maupun antar-muka lapisan CRA dan *base metal*. Pengujian kekerasan Vickers menunjukkan NM625 memiliki nilai kekerasan $228 \pm 8,8$ HV10 (layer 1) dan $231.6 \pm 10,8$ HV10 (layer 2), sedangkan RW625 memiliki nilai kekerasan $203.4 \pm 8,1$ HV10 (layer 1) dan $213.6 \pm 6,3$ HV10. Kedua filler metal menghasilkan nilai *Pitting Resistance Equivalent Number* (PREN) yang sama 48, yang menunjukkan kedua filler metal memiliki properti ketahanan korosi yang sama.

Kata Kunci: Inconel 625, korosi, cladding, GTAW

Abstract

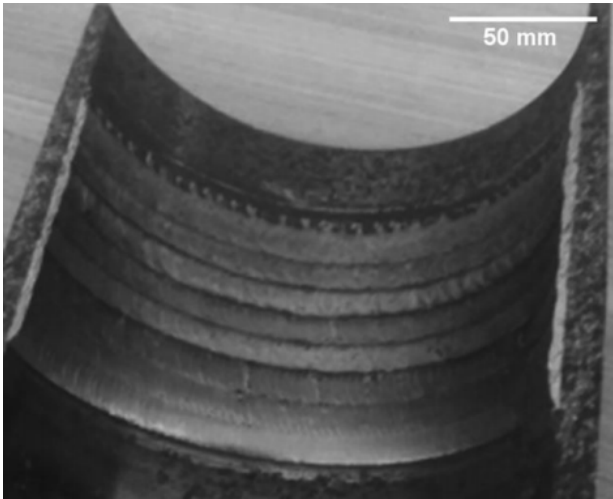
*Inconel 625 corrosion resistant alloy (CRA) cladding produces corrosion resistant of Inconel 625 and high strength steel pipe of API 5L X65. CRA is cladded by Pulsed Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). ERNiCrMo-3 filler metal from different brand, RW625 and NM625, was welded to produced CRA. Non-destructive testing of visual testing, liquid penetrant testing, and ultrasonic testing showed a sound weld of CRA layer and welded CRA – base metal interface. Vickers hardness testing resulted $228 \pm 8,8$ HV10 (layer 1) dan $231.6 \pm 10,8$ HV10 (layer 2) while RW625 resulted $203.4 \pm 8,1$ HV10 (layer 1) dan $213.6 \pm 6,3$ HV10. These filler metals produce same *Pitting Resistance Equivalent Number* (PREN) of 48, which indicates both have similar corrosion resistant.*

Keywords: Inconel 625, corrosion, cladding, GTAW

1.0 PENDAHULUAN

Gas alam merupakan salah satu sumber energi yang penting bagi manusia. Untuk dapat memanfaatkannya, manusia perlu menambang dan mengalirkannya melalui pipa dengan panjang bisa mencapai puluhan kilometer tergantung letak cadangan gas dan sumber pengolalahannya. Pipa yang umum digunakan untuk mengalirkan gas terbuat dari baja dikarenakan memiliki kekuatan yang tinggi dan harga yang murah dibandingkan dengan logam lainnya. Gas yang berasal dari alam memiliki kandungan *sour gas* berupa H_2S dan CO_2 yang bersifat korosif terhadap pipa baja. Permasalahan korosi pada pipa baja untuk distribusi gas alam bisa diatasi dengan memberikan lapisan material tahan korosi. Proses

cladding ini umumnya menggunakan lapisan *corrosion resistant alloy* (CRA) pada lapisan pipa baja bagian dalam. Dengan memadukan kekuatan mekanik pipa baja dengan ketahanan korosi lapisan CRA akan diperoleh biaya yang lebih ekonomis daripada menggunakan pipa CRA keseluruhan [1]. Pipa baja yang dilapisi dengan CRA seperti pada Gambar 1 dapat diproduksi melalui pengelasan sehingga terjadi fusi antara baja dengan CRA. Salah satu proses yang umum digunakan dalam cladding adalah pengelasan otomatis GTAW [2], [3], [4].



Gambar 1. Penampang pipa API 5L X65 dengan lapisan CRA [5]

Inconel 625 (UNS06625)) merupakan paduan nikel dengan kekuatan strength yang tinggi dan ketahanan korosi yang baik pada lingkungan korosif [6], [7]. Paduan nikel (Ni) ini memiliki unsur paduan krom (Cr) yang meningkatkan ketahanan korosi pada suhu tinggi, molybdenum (Mo) yang meningkatkan ketahanan korosi, dan niobium (Nb) yang menghambat korosi pada butir (*intergranular corrosion*) akibat presipitasi karbida. Karena ketahanan terhadap korosi tersebut paduan Inconel 625 digunakan sebagai material CRA

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah *filler metal* CRA ini bisa diaplikasikan untuk *base material* API 5L X65 sesuai dengan kriteria keberterimaan dengan variabel pengelasan yang telah ditentukan. Selain itu, penelitian ini menggunakan dua merk filler metal yang berbeda. Penggunaan dua filler metal untuk mengetahui apakah perbedaan merk, yang menurut spesifikasi merupakan *essential variable*, akan menghasilkan CRA dengan karakteristik yang berbeda.

2.0 METODE

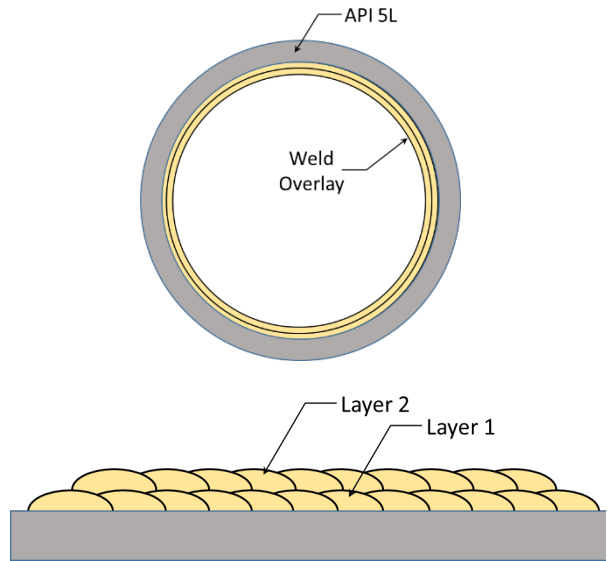
Sampel dalam penelitian ini berupa steel pipe API 5L Grade X65 dengan kandungan unsur seperti pada Tabel 1. Pipa tersebut dilapisi dengan *corrosion resistant alloy* (CRA) menggunakan material ERNiCrMo-3 dari dua merk yang berbeda, yaitu RW625 dan NM625. Perbedaan komposisi unsur kedua filler metal tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan unsur base metal dan filler metal

Kandungan Unsur	API 5L X65 (%)	RW625 (%)	NM625 (%)
C	0,12	0,010	0,007
Mn	1,75	0,030	0,091
Si	0,40	0,060	0,078
S	0,004	0,001	0,0005
P	0,025	0,003	0,007
Ni	0,5	64,50	64,00
Cr	0,5	22,24	22,18

Mo	0,5	8,68	9,08
Al	-	0,10	0,079
Co	-	0,010	0,022
Ti	-	0,20	0,217
Nb	-	3,79	3,66
Fe	Balance	0,23	0,289
Cu	0,5	0,01	0,005
Ta	-	0,0032	0,0030

Pelapisan CRA dalam pipa dilakukan dengan pengelasan Pulsed GTAW untuk menghasilkan dua lapisan CRA. *Background current* dan *peak current* tiap layer diatur sesuai dengan Tabel 2. Pengelasan dilakukan secara otomatis pada posisi flat dengan pipa yang berputar pada *rotator*.



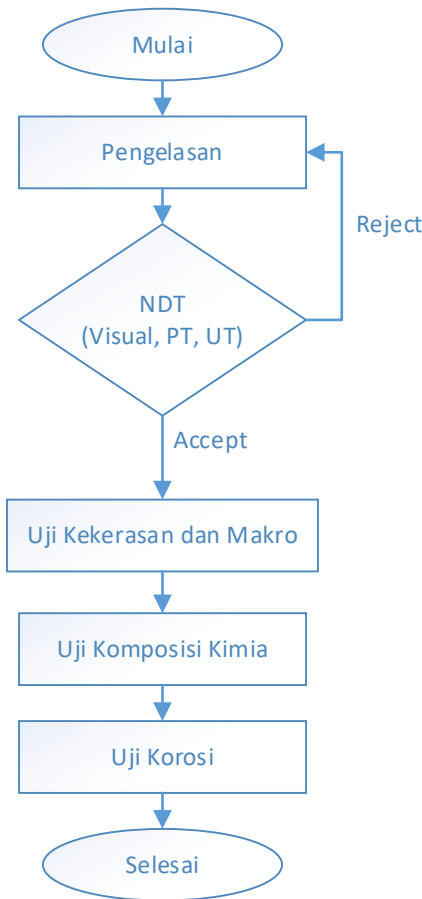
Gambar 2. Pipa baja dengan lapisan CRA pada bagian dalam

Tabel 2. Variabel pengelasan

Variabel	Nilai
Proses	GTAW-Pulsed
Base Metal	API 5L X65
Tebal Base metal	8,18 mm
Diameter pipa	219,1 mm
Diameter filler metal	1,2 mm
Gas Pelindung	100% Argon
Gas Flow Rate	25 L/min
Arus Layer 1	Background: 220-230 A Peak: 270-280 A
Arus Layer 2	Background: 230-240 A Peak: 280-290 A

Pengujian sampel dilakukan sesuai dengan ASME Section IX Tabel QW-453 untuk pengelasan CRA

mengikuti diagram alir Gambar 3 [8]. Pengujian yang wajib dilakukan menurut ASME Section IX adalah *visual testing*, *liquid penetrant testing* dan uji *side bending*. Pengujian komposisi unsur dapat dilakukan jika diperlukan. *Visual testing* dilakukan sebagai persyaratan sesuai dengan Artikel QW-143 dan kriteria keberterimaan pada QW-194. Identifikasi *surface defect* dilakukan dengan metode *visual testing* yang dilanjutkan dengan *liquid penetrant testing*. *Visual testing* dilakukan sesuai dengan ASME V Article 9 [9].



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Liquid penetrant testing digunakan setelah inspeksi visual sesuai dengan metode ASME V Article 24 [9]. *Liquid penetrant testing* dilakukan pada permukaan CRA dengan keberterimaan pada Artikel QW-195. Pengujian ini menggunakan *penetrant visible (Type I)*, metode *water washable (Method A)*, *developer non-aqueous (Form e)*. Produk penetrant yang digunakan berupa Chemetall Checkmor 240, *developer* berupa Chemetall LD7 dan cleaner adalah air.

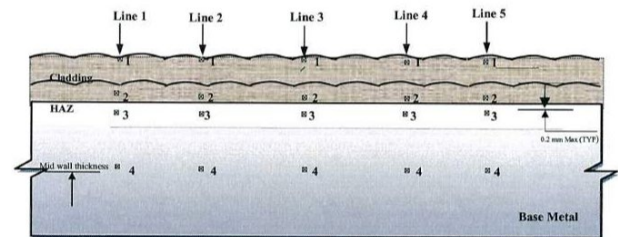
Ketebalan lapisan CRA juga diukur sesuai dengan *client specification* [10]. Pengukuran ketebalan CRA dilakukan pada 4 lokasi dengan jarak 90° pada 7 lokasi. Ketebalan CRA diukur berdasarkan selisih ketebalan pipa awal terhadap ketebalan pipa yang sudah cladding. Uji *macro-etching* digunakan untuk mengkonfirmasi ketebalan CRA. Selain ketebalan CRA, ultrasonic testing juga

digunakan untuk mendeteksi *lamination defect* pada base metal maupun pada lapisan CRA. *Ultrasonic testing* menggunakan UT flaw USM 36 Type 37460 dan probe normal (0°) Phoenix 4 MHz. Deteksi defect dilakukan dengan metode 6 dB drop.

Setelah NDT menunjukkan sampel bebas dari *defect* maka dilakukan pengujian destruktif berupa pengujian *side bending*. Pengujian *side bending* dilakukan terhadap empat spesimen yang dipotong melintang terhadap arah pengelasan. Pengujian dilakukan menggunakan *guided bend test* dengan diameter *former* 40 mm dan jarak *shoulder* 63 mm. Spesimen diuji hingga membentuk sudut 180° sesuai dengan Artikel QW-162 [8].

Pengujian komposisi unsur lapisan CRA dilakukan untuk menentukan nilai *Pitting Resistance Equivalent Number (PREN)* yang menunjukkan ketahanan terhadap *pitting corrosion* pada paduan baja dan nikel [11], [12]. Pengujian dilakukan dengan Optical Emission Spectrometer (OES) Thermo Scientific ARL 3460 Metal Analyzer. Lokasi pengujian diambil pada lapisan CRA berjarak 2 mm dari base metal [10].

Sampel juga diuji dengan nilai kekerasan (*hardness value*) dengan menggunakan metode Vickers hardness sesuai dengan Artikel 7.5 [10]. Pengujian Vickers hardness dilakukan pada masing-masing lapisan CRA, HAZ, dan base metal sebanyak 5 lokasi seperti Gambar 4. Pengujian menggunakan Mitutoyo Vickers Hardness Testing HV-113 dengan beban 10kgf.



Gambar 4. Pemetaan pengujian Vickers hardness.

Pengujian dilanjutkan menggunakan uji komposisi kimia pada daerah weld metal sekitar 1,5 mm di atas fusion line. Pengujian komposisi kimia juga digunakan untuk menghitung PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) yaitu suatu nilai yang bisa digunakan untuk mengetahui ketahanan material terhadap korosi pitting.

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

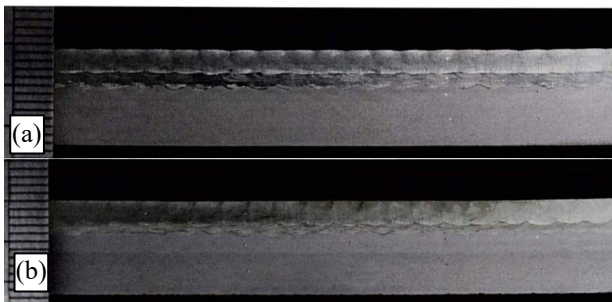
Hasil pengukuran ketebalan lapisan cladding dilakukan dengan ultrasonic testing mengikuti spesifikasi yang ditentukan dalam *client specifications* [10]. Pengelasan 2 layer CRA menghasilkan ketebalan rata-rata 4,1 mm untuk RW25 dan 4,21 mm untuk NM625 seperti ditunjukkan pada Tabel.4. Aramco dalam Artikel 7.2 menyatakan bahwa ketebalan lapisan CRA untuk pengujian *welding procedure* tidak boleh lebih daripada

3,5 mm [10]. Ketebalan lapisan CRA yang melebihi ketentuan dapat dilakukan pengurangan secara mekanik.

Tabel 4. Ketebalan CRA dari pengujian ultrasonik

Ketebalan pipa	RW25	NM625
Sebelum cladding	8,26 mm	8,26 mm
Setelah cladding	12,36 mm	12,47 mm
Selisih	4,1 mm	4,21 mm

Gambar makro pada Gambar 5 menunjukkan penampang melintang lapisan CRA (dua lapisan) yang fusi dengan base metal. Ketebalan CRA RW625 dan NM625 kurang lebih sama pada rentang 4 mm.



Gambar 5. Pengujian macro-etching sampel (a) RW625, dan (b) NM625

Kriteria keberterimaan visual testing dan liquid penetrant testing menggunakan ASME IX [8]. Artikel QW-194 menyatakan bahwa crack pada sampel tidak diperbolehkan dan, base metal dengan weld metal ataupun antar weld metal harus dalam kondisi fusi. Pada sampel RW625 dan NM625 tidak ditemukan surface defect dan disimpulkan sesuai dengan ASME Section IX. Selanjutnya, dilakukan liquid penetrant testing untuk mendeteksi surface defect berukuran kecil yang tidak terdeteksi dengan visual testing. Artikel QW-195.2 yang menyatakan bahwa indikasi yang dapat disebabkan oleh cacat pengelasan (*relevant indication*) adalah indikasi dengan ukuran lebih besar daripada 1,5 mm dengan bentuk memanjang (*linear indication*) atau bulat/elips (*rounded indication*). Kriteria keberterimaan liquid penetrant Menyatakan bahwa tidak boleh terdapat indikasi berupa linear indication; rounded indication dengan diameter lebih daripada 5 mm; atau *relevant rounded indication*. Hasil penetrant testing RW625 dan NM 625 tidak menunjukkan *relevant indication* berupa *linear indication* maupun *rounded indication*.

Deteksi subsurface defect pada lapisan CRA maupun base metal dilakukan dengan metode NDT ultrasonic testing. Pengujian ini tidak mendeteksi adanya lamination defect maupun *imperfection* lain seperti lack fusion, inclusion maupun *crack* pada sampel RW625 dan NM625. Hasil NDT menunjukkan bahwa tidak terdapat defect (*sound weld*) pada permukaan maupun bagian internal (*sub-surface*) pada sampel RW625 dan NM625, sesuai dengan kriteria keberterimaan welding code.

Pengujian side bending dilakukan dengan mendeteksi opening pada permukaan lengkung terluar spesimen

terutama pada area weld metal dan HAZ. Artikel ASME IX QW-163 menyatakan bahwa sampel cladding tidak boleh terdapat *open discontinuities* melebihi 1,5 mm pada lapisan CRA dan 3 mm pada antarmuka CRA dengan base metal [8]. Pengamatan sampel RW625 dan NM625 tidak menemukan *open discontinuities*. Ini menunjukkan kualitas pengelasan (*soundness of weld*) yang baik dan tidak terdapat *imperfection*. Selain itu, keuletan sampel lapisan CRA dan bagian antarmuka lapisan CRA dengan *base metal* sebanding dengan ditunjukkan tidak terdapat *open discontinuities* [13], [14].

Uji kekerasan Vickers dilakukan pada tiap lapisan CRA, HAZ, dan base metal dengan filler metal RW625 dan NM625 ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6. Filler metal RW625 menghasilkan CRA dengan nilai kekerasan pada rentang 192 – 215 HV10 untuk lapisan 1 CRA dan rentang 202 – 220 HV10 untuk lapisan 2 CRA, 140 – 152 HV10 untuk bagian HAZ, dan 173 – 184 HV10 untuk base metal. Sedangkan *filler metal* NM625 menghasilkan cladding dengan kekerasan 216 – 236 HV10 untuk lapisan 1 CRA dan 220 – 250 HV10 untuk lapisan 2 CRA, 140 – 151 HV10 untuk bagian HAZ, dan 173 – 186 HV10 untuk base metal.

Spesifikasi Aramco menyatakan bahwa nilai kekerasan HAZ tidak boleh melebihi 250 HV10. Berdasar data tersebut kedua filler metal menghasilkan *cladding* yang sesuai dengan kriteria keberterimaan tersebut. Sedangkan untuk lapisan CRA dan base metal tidak boleh melebihi keberterimaan yang diatur oleh NACE MR0175 yang menyatakan bahwa nilai kekerasan tidak boleh melebihi 275 HV10 [15].

Tabel 5. Nilai kekerasan Vickers cladding RW625.

Lokasi	Nilai Kekerasan Vickers (HV10)				
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
CRA 2	213	220	202	215	218
CRA 1	208	215	205	197	192
HAZ	145	148	142	152	140
BM	175	173	180	174	184

Tabel 6. Nilai kekerasan Vickers cladding NM625.

Lokasi uji	Nilai Kekerasan Vickers (HV10)				
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
CRA 2	227	224	250	220	237
CRA 1	216	222	236	226	240
HAZ	147	141	146	140	151
BM	186	180	174	181	173

Nilai kekerasan rata-rata cladding ditunjukkan pada Tabel 7. tidak terdapat perbedaan signifikan nilai kekerasan base metal dan HAZ kedua sampel. Nilai kekerasan pada lapisan cladding menunjukkan perbedaan antara RW625 dan NM625. RW 625 menghasilkan lapisan CRA dengan nilai kekerasan rata-rata 203 HV10 dan 213 HV10 untuk lapisan pertama dan kedua. Sedangkan NM625 menghasilkan 228 HV10 dan 231 HV10 untuk lapisan pertama dan kedua. Nilai kekerasan rata-rata lapisan cladding RW625 lebih rendah daripada NM625.

Tabel 7. Nilai kekerasan Vickers cladding RW625 dan NM625

Test Location	Nilai Kekerasan Vickers (HV10)	
	RW625	NM625
CRA 2	213.6 ±6,3	231.6 ±10,8
CRA 1	203.4 ±8,1	228 ±8,8
HAZ	145.4 ±4,3	145 ±4,1
BM	177.2 ±4,2	178.8 ±4,8

Ketahanan CRA stainless steel dan paduan nikel terhadap pitting corrosion dinyatakan dalam nilai PREN. Nilai PREN dihitung sebagai fungsi kandungan krom, molybdenum, tungsten, dan nitrogen [10], [12], [15], [16]. Penghitungan nilai PREN menggunakan data kandungan unsur CRA dari pengujian OES dalam Persamaan 1.

$$PREN = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16(\%N) \quad (1)$$

Tabel 8. Kandungan unsur CRA dari pengujian Optical Emission Spectroscopy.

Unsur	Komposisi unsur (%)	
	RW625	NM625
C	0,030	0,023
Si	0,080	0,083
Mn	0,070	0,111
P	0,010	0,007
Cr	20,70	20,48
Mo	8,30	8,34
Fe	7,570	6,787
Al	0,240	0,115
Co	0,060	0,042
Nb	3,470	3,216
Ti	0,270	0,217
Ta	0,120	0,082
Ni	59,000	60,458

Pengujian OES tidak dapat mendeteksi kandungan nitrogen dan tungsten sehingga penghitungan nilai PREN dilakukan tanpa kedua unsur tersebut. Menggunakan persamaan (1), lapisan CRA RW625 memiliki nilai PREN sebesar 48,09 sedangkan NM625 bernilai 48,002. Nilai kedua sampel tersebut sudah melebihi batas nilai PREN minimum 45 [10]. Nilai PREN tinggi menunjukkan ketahanan material terhadap pitting corrosion [16], [17]. Kandungan krom dalam material menghasilkan terbentuknya oksida krom pada permukaan material. Oksida krom tersebut akan menahan laju korosi yang pada awalnya terjadi pada permukaan dan berlanjut ke bagian internal. Dalam mekanisme ini krom membentuk lapisan *passivation* pada permukaan sehingga korosi tidak terjadi [18].

Dalam material dengan kandungan krom yang tinggi, molybdenum membantu ketahanan korosi terutama dalam *passivation* dan *stabilization* ketika terjadi *pitting corrosion* [19]. Pada permukaan molybdenum berperan dalam *surface passivation* dengan mendorong adsorpsi

oksigen membentuk oksida. Oksida molybdenum tersebut membantu oksida nikel dan oksida krom membentuk lapisan *passivation* yang tahan terhadap korosi. Selain itu, pada paduan nikel-krom molybdenum juga berperan sebagai kation yang menghambat mobilitas kation. Terhambatnya mobilitas kation secara elektrostatik ini bermanfaat dalam menahan laju *pitting corrosion* pada CRA.

4.0 KESIMPULAN

Kualifikasi lapisan CRA dari Inconel 625 dilakukan dengan pengujian *visual testing*, *liquid penetrant testing* dan *ultrasonic testing* untuk memastikan tidak terdapat cacat las. Pengujian side bending menunjukkan bahwa pengelasan API 5L X65 dan Inconel 625 menghasilkan pengelasan yang fusi dengan ditunjukkan tidak adanya *opening*. Pengujian kekerasan Vickers menunjukkan lapisan CRA NM625 menghasilkan lapisan lebih keras daripada RW625. Tetapi keduanya masih mengikuti spesifikasi. Ketahanan pitting corrosion berdasar nilai PREN menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan nilai secara signifikan. Berdasarkan pengujian non-destruktif maupun destruktif, filler metal RW625 dan NM625 menghasilkan lapisan CRA dengan karakteristik yang hampir sama serta sesuai dengan keberterimaan *welding code* ASME Section IX dan NACE MR0175. Walaupun berdasarkan spesifikasi, merk atau trade name filler metal merupakan *essential variable* tetapi pengujian menunjukkan kedua filler metal tersebut menghasilkan karakteristik yang hampir sama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Bjaaland, *Evaluation of Welded Clad Pipe: Microstructures and Properties*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [2] L. Xu, C. Shao, L. Tian, J. Zhang, Y. Han, L. Zhao and H. Jing, "Intergranular corrosion behavior of Inconel 625 deposited by CMT/GTAW," *Corrosion Science*, vol. 201, p. 110295, 2022.
- [3] L. Xu, J. Zhang, Y. Han, L. Zhao and H. Jing, "Insights into the intergranular corrosion of overlay welded joints of X65-Inconel 625 clad pipe and its relationship to damage penetration," *Corrosion Science*, vol. 160, p. 108169, 2019.
- [4] K. Song, Z. Wang, S. Hu, S. Zhang and E. Liang, "Welding current influences on Inconel 625/X65 cladding interface," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 33, no. 7, pp. 770-777, 2018.
- [5] R. Knerek, G. V. B. Lemos, G. V. Voort, D. A. de Freitas, W. Haupt, R. Landell and D. Buzzatti, "Investigating an API X65 steel pipe clad with alloy 625," *Technology in Metallurgy, Materials, and Mining*, vol. 18, p. e2465, 2021.
- [6] V. Shankar, B. S. Rao and S. L. Mannan, "Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy," *Journa of Nuclear Materials*, vol. 288, pp. 222-232, 2001.

- [7] C. P. Alvaraes, J. C. F. Jorge, L. F. G. de Souza, L. S. Araujo, M. C. Mendes and H. N. Farneze, "Microstructure and corrosion properties of single layer Inconel 625 weld cladding obtained by the electroslog welding process," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 8, pp. 16146-16158, 2020.
- [8] The American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedure; Welders; Brazzers; and Welding, Brazzing, and Fusing Operators*, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [9] The American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V Nondestructive Test*, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [10] S. Aramco, *Weld Overlayed Fittings, Flanges, and Spool Pieces (02-SAMSS-012)*, Aramco Materials Engineering Standards Committee, 2016.
- [11] R. A. Lorenzoni, R. A. Gasparini, M. C. Macêdo and E. A. Ponzio, "Influence of heat input and chemical dilution on Critical Pitting Temperature of coatings from Inconel 625 deposited by PTA-P," in *Intercorr 2016*, Rio de Janeiro, 2016.
- [12] B. Barbosa, S. Tavares, A. Cobuci and M. de Macêdo, "Influence of Microstructure on Pitting Corrosion Resistance of Alloy 904L Superaustenitic Stainless Steel," *Corrosion*, vol. 68, no. 8, pp. 739-746, 2012.
- [13] M. Kimura, K. Suzuki, M. Kusaka and K. Kaizu, "Effect of friction welding condition on joining phenomena, tensile strength, and bend ductility of friction welded joint between pure aluminium and AISI 304 stainless steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 116-125, 2016.
- [14] R. G. Tayatac and E. B. O. Ang, "Assesment of Corrosion Resistance Alloy (CRA) clad material for geothermal wellhead pipping system," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 207-219, 2022.
- [15] NACE International, *Petroleum and natural gas industries: Materials for use in H2S-containing environment in oil and gas production*, NACE International, 2001.
- [16] P. R. Roberge, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [17] S. Papavinasam, *Corosion Control in the Oil and Gas Industry*, Elsevier, 2014.
- [18] H. S. Klepper, N. S. Zadorosne and R. B. Rebak, "Localized corrosion characteristics of nickel alloys: A review," *Acta Metalurgica Sinica (English Letters)*, vol. 30, pp. 296-305, 2017.
- [19] K. L. Cwalina, C. R. Demarest, A. Y. Gerard and J. R. Scully, "Revisiting the effects of molybdenum and tungsten alloying on corrosion behavior of nickel-chromium alloys in aqueous corrosion,"